

Recibido: 24-04-2014
Aceptado: 05-06-2014

REVISTA DE TELEDETECCIÓN
Asociación Española de Teledetección
(2014) 41, 59-69
ISSN 1133-0953
EISSN 1988-8740
<http://dx.doi.org/10.4995/raet.2014.2314>

Validación local de la temperatura superficial del mar del sensor MODIS en aguas someras del Mediterráneo occidental

Durá, E.^{*1,3}, Mendiguren, G.¹, Martín, M.P.¹, Acevedo-Dudley, M.J.², Bosch-Bolmar, M.², Fuentes, V.L.², Bordehore, C.³

¹ Instituto de Economía, Geografía y Demografía. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Albasanz, 26-28, 28037, Madrid, España.

² Departamento de Biología Marina y Oceanografía, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Ps. Marítim de la Barceloneta, 37-49, 08003, Barcelona, España.

³ Departamento de Ecología, Universidad de Alicante, Ap. 99-E-03080, Alicante, España.

Resumen: La temperatura superficial del mar (SST) estimada a partir de los productos 11 μm diurnos y nocturnos y 4 μm nocturnos del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo de la plataforma Aqua, han sido comparados con datos medidos *in situ* a tres profundidades diferentes (15, 50 y 100 cm) en una zona costera del Mediterráneo Occidental. Esta comparación ha permitido analizar la incertidumbre que existe en la estimación de este parámetro en aguas someras y próximas a la costa mediante imágenes de satélite de baja resolución espacial. Los resultados obtenidos demuestran que el producto diurno SST_{11 μm} obtiene los estadísticos RMSE (error cuadrático medio) y r^2 (coeficiente de correlación de Pearson) más ajustados con valores de 1°C y 0,96, respectivamente, para la profundidad 50 cm.

Palabras clave: MODIS, SST, Mediterráneo, aguas costeras.

Local validation of MODIS sensor sea surface temperature on western Mediterranean shallow waters

Abstract: The sea surface temperature (SST) estimated from MODIS Aqua products (daytime and nighttime 11 μm and night 4 μm) has been correlated with field data taken at three depths (15, 50, 100 cm) in a Western Mediterranean coastal area. The comparison has allowed us to analyze the uncertainty in the estimation of this parameter in coastal waters using low spatial resolution satellite images. The results show that the daytime SST_{11 μm} product obtains fittest statistical values: RMSE (root mean square error) and r^2 (Pearson's correlation coefficient) of 1°C and 0.96, respectively, for 50 cm depth.

Key words: MODIS, SST, Mediterranean Sea, coastal waters.

1. Introducción

La temperatura del mar es uno de los parámetros que más influencia tienen sobre las condiciones globales del planeta, llegando a relacionarse con multitud de fenómenos climáticos a nivel mundial

(Tokioka, 1983). Algunos modelos climáticos la consideran buena predictora de fenómenos como las glaciaciones, los huracanes e incluso de los períodos de sequías e inundaciones en distintas regiones del mundo (Shabbar *et al.*, 1997; Hernández, 2002).

* Autor para la correspondencia: elia.dura@cchs.csic.es

Según datos referidos al año 2000, en las últimas 4 décadas se habría producido un incremento total de la temperatura media del agua de los océanos de $0,06^{\circ}\text{C}$ (Levitus *et al.*, 2000). Este incremento, asociado al Cambio Climático, está modificando, entre otros, el estatus y la localización de las poblaciones animales (Harvell *et al.*, 2002), provocando, posiblemente, un aumento de la distribución espacial y temporal de algunas especies de medusas (Purcell, 2005). En determinadas zonas del Mediterráneo se observan cada vez con mayor frecuencia grandes proliferaciones de gelatinosos (Brotz *et al.*, 2012) que impactan negativamente en los ecosistemas (Fuentes *et al.*, 2010) y en diferentes actividades antrópicas entre las que se encuentra el turismo costero (Bordehore *et al.*, 2011).

Los sensores térmicos ubicados en plataformas espaciales permiten realizar el seguimiento y evolución de la temperatura del mar de forma continua desde un punto de vista espacial y temporal, lo que posibilita la evaluación de los cambios que se están produciendo. La facilidad de acceso a este tipo de información, unida a su alta frecuencia temporal y bajo coste han facilitado que el uso de imágenes de satélite haya crecido de forma considerable en los últimos años en muchos campos científicos (López Saldaña *et al.*, 2011), convirtiéndose en una herramienta estratégica para el seguimiento del Cambio Climático a nivel local y global. Sin embargo, para poder aplicar la información estimada por satélite a modelos globales de distribución de seres vivos en escenarios futuros bajo un marco de Cambio Climático, es necesario evaluar las incertidumbres de los datos comparando las estimaciones con mediciones realizadas *in situ*.

La validación de los datos térmicos de satélite con mediciones *in situ* en áreas costeras conlleva diversas incertidumbres que es preciso tener en cuenta. En primer lugar están las incertidumbres relacionadas con los datos que se comparan en la validación. Mientras la SST derivada del satélite corresponde a la temperatura superficial del mar (*skin layer*), la SST registrada mediante boyas flotantes o sondas multiparamétricas corresponde a la temperatura de zonas situadas inmediatamente por debajo de la superficie (*Bulk layer*) (Schuessel *et al.* 1990). Las relaciones entre estos dos conjuntos de datos están fuertemente influenciadas por el estado de la mar, las condiciones meteorológicas y la oceanografía local (Donlon *et al.*, 2002; Smale y Wernberg, 2009).

En zonas costeras encontramos un problema adicional, la presencia de píxeles mezcla en los que se produce contaminación terrestre de la temperatura superficial captada por el sensor.

En áreas litorales, además, es frecuente la acumulación de vapor de agua en la atmósfera (*seebreaze*) debido a las diferencias térmicas entre las grandes masas de Tierra y Océano. Estas nubes pueden alterar el valor de temperatura medido por el sensor si no se corrige de manera precisa (Brown y Minnet, 1999).

Por último, en la bibliografía se hace referencia a otros factores costeros como las mareas, corrientes locales, escorrentía de los ríos y aerosoles marinos (Gentemann *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2004; Xie *et al.*, 2008) como posibles causas de incertidumbre asociada a la comparación de las temperaturas derivadas del satélite con las mediciones *in situ* en áreas costeras.

A pesar de las dificultades mencionadas, el objetivo de este trabajo ha sido comparar los tres productos de temperatura superficial derivados del sensor MODIS, a bordo de la plataforma Aqua, (*SST_4Nighttime*, *SST_11Daytime* y *SST_11Nighttime*) con los datos de temperatura registrados *in situ* tras el sondeo en una zona costera del mediterráneo occidental (Dénia, España). Mediante la comparación de los datos del satélite con las temperaturas a diferentes profundidades en la columna de agua, se trata de evaluar cuál es el producto MODIS que menores diferencias presenta frente a los datos registrados en campo. Además, esta comparación nos permitirá definir las profundidades más idóneas para muestrear y usar como variable explicativa en modelos locales de distribución de especies, así como, en escenarios futuros globales que utilicen como variable de entrada los productos de SST derivados de MODIS. Finalmente, con este trabajo se ha evaluado las ventajas y desventajas de los productos SST de MODIS en su aplicación en ecosistemas costeros.

El estudio se ha desarrollado en el marco del proyecto LIFE+ 08NAT- CUBOMED (<http://www.cubomed.eu/>) que estudia la problemática ocasionada por la proliferación masiva de organismos gelatinosos en algunos puntos del litoral mediterráneo español y pretende conocer los requerimientos ambientales que determinan su presencia.

2. Material y métodos

2.1. Área de estudio

La zona de estudio se localiza en el litoral del municipio de Dénia (0°2'47,7"E; 38°50'37,0"N) situado al norte de la provincia de Alicante (España) (Figura 1A). Abarca 17 km a lo largo del litoral y 500 m de ancho aguas adentro desde la línea de costa (Figura 1B).

La costa está compuesta por zonas de acantilados en la parte Este y extensas playas de arenas desde la zona portuaria hacia el Oeste. A lo largo del perfil de costa se intercalan diversos afluentes de aguas continentales y subterráneas que dotan a esta zona de gran diversidad ambiental.

2.2. Mediciones *in situ*

Las mediciones se realizaron desde una embarcación tipo *zodiac* mediante el lanzamiento vertical de una sonda de medición multiparamétrica CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*), COMPACT CTD-Lite de JFE Advantech (Nishinomiya, Japan) programada para registrar datos cada segundo. En total se evaluaron 80 puntos de muestreo georeferenciados mediante un GPS Magellan (San Dimas, CA, USA) divididos en 20 estaciones de medición separadas aproximadamente 1 km entre sí (Figura 1B). En cada punto de muestreo se han analizado tres profundidades diferentes: profundidad 15 (entre 15-25 cm), profundidad 50 (entre 50-60 cm) y profundidad 100 (entre 100-110 cm):

promediando todos los registros existentes en ese rango de 10 cm para cada profundidad. Estas medidas fueron tomadas con frecuencia mensual entre los meses de junio de 2010 y diciembre de 2012. No se recogieron datos de velocidad del viento durante todo el periodo de estudio, por lo que este parámetro no ha sido utilizado en los análisis.

2.3. Productos MODIS

El sensor MODIS forma parte del conjunto de sensores instalados a bordo de las plataformas de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) Terra (EOS am) y Aqua (EOS pm). Ambos satélites observan la superficie completa de la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales entre 0,405 y 14,385 μm . La estimación de la SST por MODIS está basada en la información captada por el sensor en las regiones del infrarrojo medio (Bandas 20, 22, 23 localizadas en torno a 4 μm) y del infrarrojo térmico (Bandas 31 y 32 localizadas entre 10 y 12 μm) (Tabla 1). Las bandas situadas en el infrarrojo medio muestran una alta sensibilidad y están ubicadas en una ventana del espectro donde la influencia de la columna de vapor de agua es mínima. Sin embargo presentan problemas de especularidad de la luz durante el día, por lo que únicamente se emplean en el producto derivado de la pasada nocturna del satélite (*SST_4Nighttime*) (Brown y Minnett, 1999). En este estudio el producto *SST_4Nighttime* resulta de gran interés debido a la dificultad de estimar la temperatura de superficie en zonas de alta persistencia de nubes en periodos concretos del año, propias

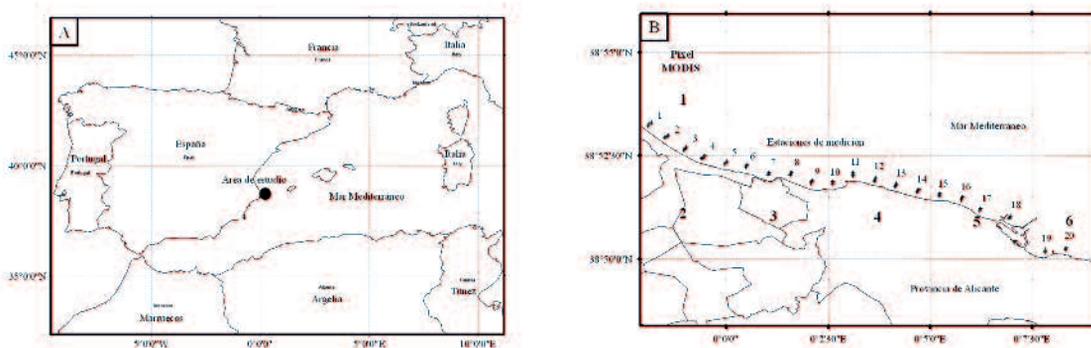


Figura 1. Localización del área de estudio (A) y localización de las 20 estaciones de medición (B).

de áreas costeras en Alicante (Azorín-Molina y Martín-Vide, 2007).

Por su parte, las bandas localizadas en el infrarrojo térmico se encuentran cerca de la emisión máxima de un cuerpo negro a 300 K (una aproximación de la temperatura media de la Tierra), son más anchas y no presentan problemas de especularidad diurna. Estas bandas son mucho más sensibles que las localizadas en infrarrojo medio a la columna de vapor de agua en el aire por lo que ambas regiones espectrales resultan complementarias en la estimación de la SST (Brown y Minnett, 1999). A partir de estas bandas se derivan el producto diurno y nocturno: *SST_Daytime* y *SST_11Nighttime*, respectivamente.

Para este trabajo se han utilizado los tres productos MODIS de SST disponibles del satélite Aqua: *SST_4Nighttime*, *SST_11Daytime* y *SST_11Nighttime*. Todos los productos analizados pertenecen al nivel 3 (L3) de procesado (http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/MODIS_AQUA_L3_SST_THERMAL_MONTHLY_4KM_DAYTIME) con resolución espacial de 4,63 km, una resolución temporal de 8 días y con una banda adicional indicando la calidad del dato. Los productos de nivel 3 están sometidos a diversos procesos de filtrado que dan lugar a datos depurados en los que se ha eliminado o reducido los efectos de las nubes, los aerosoles o la contaminación de la temperatura de los píxeles tierra (Franz, B. 2006). Por ello, hemos utilizado únicamente los píxeles libres de toda perturbación, cuyo parámetro de calidad asociado presenta el valor 0 (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/Ocean_Level-3_SMI_Products.pdf).

Si bien existen productos MODIS SST de nivel 2 (L2) diarios y con una resolución espacial mayor, de 1 km (MOD28 y MYD28), en este trabajo se planteó el análisis de los productos L3 por ser más elaborados y de más fácil acceso que los anteriores con el propósito de evaluar su posible utilización por grupos de trabajo que no dispongan de gran experiencia en teledetección y por tanto, no estén

preparados para abordar ciertas tareas de procesamiento que requieren los productos MODIS de nivel 2 como eliminación de nubes y reproyección de las imágenes.

Los datos se obtuvieron desde el servidor de Oceancolor (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3>) y se han procesado con EPOC, el plugin de ENVI (Boulder, CO, USA) para Oceancolor y una rutina propia programada con el software IDL (Boulder, CO, USA).

2.4. Métodos para la comparación y validación

En este trabajo se han analizado un total de 30 escenas del sensor MODIS a lo largo del período de estudio. Un total de 180 pares de datos estimados y observados han sido comparados para cada uno de los 3 productos evaluados.

Para la comparación espacial entre los datos *in situ* y los datos de satélite se han seleccionado los puntos de muestreo incluidos en cada uno de los píxel MODIS estudiados, promediando los valores correspondientes a las estaciones incluidas en cada uno de estos píxeles. Se han analizado un total de 6 píxeles MODIS que cubren las 20 estaciones de muestreo (Figura 1B).

Para la comparación temporal entre las mediciones *in situ* y los datos de satélite se han seleccionado los productos MODIS de 8 días que contenían, dentro de este período, el día de muestreo mensual.

Como proponen Richter *et al.* (2012) para validar y comparar los datos observados y estimados mediante un modelo, se calcularon los siguientes estadísticos: número de pares de datos (n), coeficiente de determinación (r^2), pendiente de la recta de correlación (m), interceptor de la recta de correlación (b) y error medio cuadrático (RMSE) para cada uno de los productos de MODIS y para cada una de las 3 profundidades analizadas.

Hemos utilizado también Diagramas de Taylor como herramienta para evaluar el rendimiento de los tres modelos de SST. Este diagrama utiliza la ley de cosenos para representar en una sola gráfica cómo varían simultáneamente los tres estadísticos más representativos del rendimiento de un modelo: a) El error cuadrático medio, que permite obtener una idea de la precisión del modelo, b) La

Tabla 1. Longitudes de onda de las bandas del sensor MODIS empleadas en el cálculo de SST.

Nº de banda MODIS	Longitud de onda central (μm)
20	3,750
22	3,959
23	4,050
31	11,030
32	12,020

desviación estándar, que permite comprobar cuál es la variabilidad existente en ambas muestras de datos, pudiendo ver además si dicha variabilidad se conserva o varía en el modelo respecto a lo observado para los datos reales y c) El Coeficiente de Correlación de Pearson, r , que muestra cómo de estrecha es la relación lineal existente entre los pares de datos formados por el modelo y las determinaciones reales (Follos Pliego, 2012)

El análisis de los datos se ha llevado a cabo con el software de libre acceso R (<http://www.r-project.org>).

3. Resultados y discusión

3.1. Mediciones *in situ*

La distribución temporal de la temperatura mostró unos valores máximos promedio para las 20 estaciones analizadas de: 29,00 ($\pm 0,42$), 28,97 ($\pm 0,39$) y 28,91 ($\pm 0,45$) °C el día 23 de Agosto de 2011 (Figura 2), para las profundidades 15, 50 y 100 cm respectivamente. Las temperaturas mínimas promedio para el área de estudio se registraron el día 8 de Febrero de 2011, con valores de 12,60 ($\pm 0,59$), 12,56 ($\pm 0,53$) y 12,54 ($\pm 0,41$) °C para las profundidades 15, 50 y 100. Las temperaturas

medias promedio para todas las estaciones y todo el período de estudio fueron de 20,07 ($\pm 0,50$), 20,03 ($\pm 0,48$) y 19,96 ($\pm 0,47$) °C (Figura 2).

En general, se muestra una disminución de la temperatura conforme aumenta la profundidad aunque sin diferencias significativas entre capas (ANOVA, p -valor=0,99, F crítica=2,16), a excepción del otoño de 2011, donde el enfriamiento del agua del mar es más notable en las capas superficiales que en las profundas.

Espacialmente la temperatura tiene sus valores promedio más bajos en la estación número 20 con valores de 19,69 ($\pm 5,11$), 19,74 ($\pm 5,14$) y 19,64 ($\pm 5,11$) °C para las profundidades 15, 50 y 100 cm respectivamente (Figura 3). Los valores más altos registran las estaciones 15 con valores de 20,66 ($\pm 5,14$) °C a los 15 cm de profundidad y la estación 17 con valores de 20,45 ($\pm 5,25$) °C y 20,70 ($\pm 5,20$) °C a los 50 y 100 cm en la columna de agua. Estas diferencias de casi un grado de temperatura promedio pueden ser debidas a la heterogeneidad del ecosistema, la estación número 20 está situada en una zona de acantilados con un flujo alto de descarga de acuíferos subterráneos, mientras que las estaciones situadas en la zona oeste del puerto (15, 16 y 17) están sometidas a altas insolaciones y poca renovación de las aguas debido

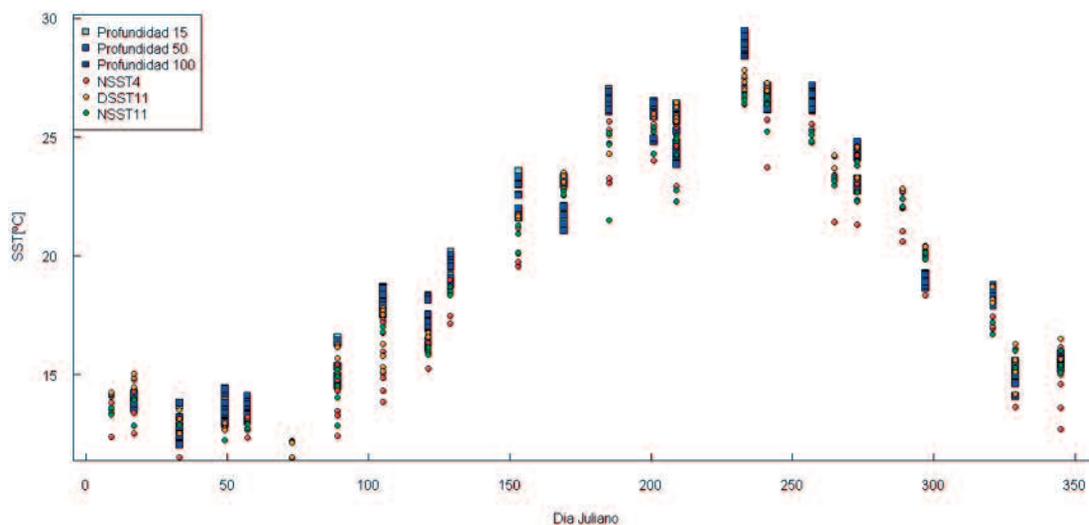


Figura 2. Dinámica anual de SST registrada con CTD a diferentes profundidades (15, 50 y 100 cm) y la dinámica estimada por productos MODIS (*SST4_Nighttime*, *SST_11Daytime* y *SST_11Nighttime*).

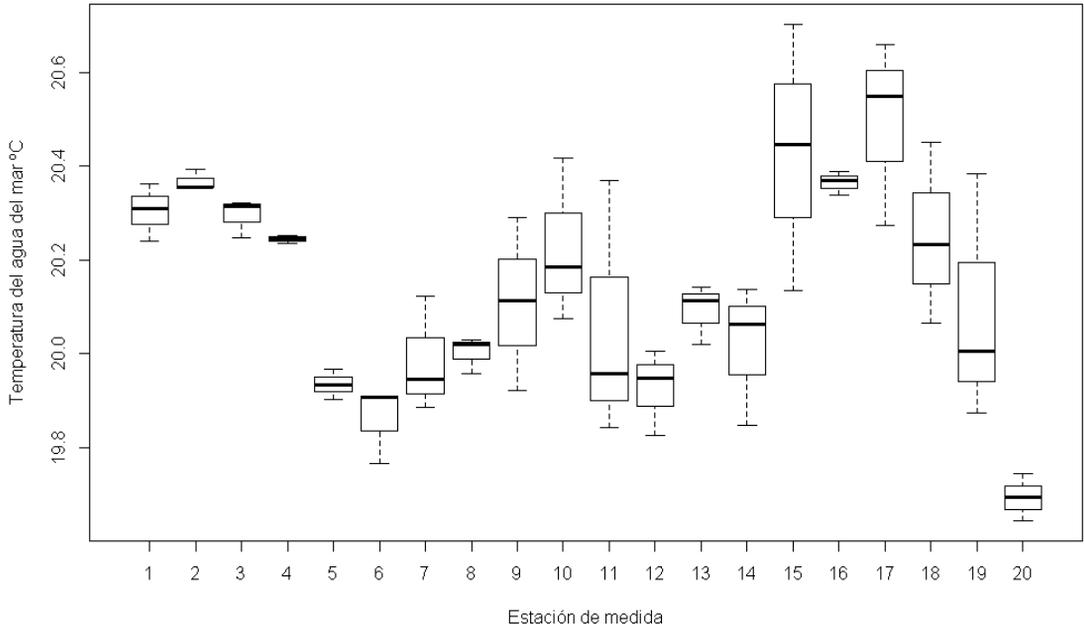


Figura 3. Distribución espacial de la temperatura del mar promedio durante todo el período de estudio para cada estación de medida, promedio de las tres profundidades.

a las dinámicas modificadas por los espigones construidos en esa zona. A pesar de estas diferencias los resultados estadísticos no muestra patrones significativos en la variabilidad de la temperatura promedio a lo largo de la costa (ANOVA, $p=0,48$, F crítica=2,16).

3.2. Productos MODIS

Para el producto nocturno de $4 \mu\text{m}$ (*SST_4Nighttime*), un 82,8% de las píxeles MODIS 13 analizados presentan valor. Todos los datos correspondientes al píxel 2 que incluye las estaciones de muestreo 4 y 5 aparecen nulos (Figura 4), lo que quiere decir que han sido eliminados mediante los indicadores de calidad propios del algoritmo en el procesamiento de nivel 3. La temperatura máxima promedio para todos los píxeles fue registrada el 21 de Agosto de 2011 con un valor de $27,14 (\pm 0,17) \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que el día 18 de Febrero de 2011 se registró la temperatura mínima promedio con un dato de $10,16 (\pm 0,93) \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 2)

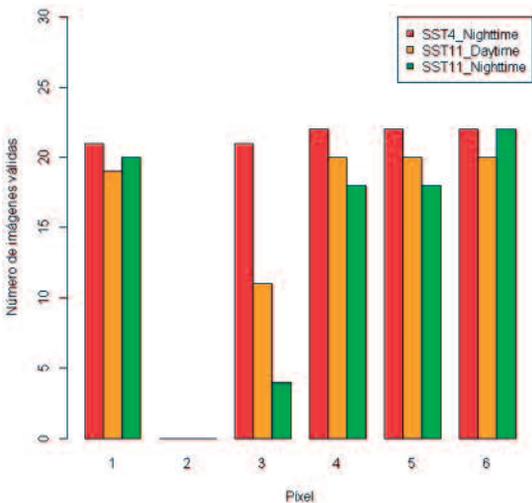


Figura 4. Número de imágenes por producto MODIS procesado y por píxel.

En el producto *SST_11Daytime* un 75,0% de los datos presentan valores nivel 3. Todos los valores del píxel 2 que incluye las estaciones de muestreo 4 y 5 y un 36,7% de los valores del píxel 3 correspondiente a las estaciones 6, 7, 8 y 9 aparecen contaminados (Figura 4). Todos los píxeles presentan algún día eliminado en el período de invierno debido a contaminación atmosférica de nubes. Al igual que en el producto nocturno, este producto también registró el 21 de Agosto de 2011 la temperatura máxima promedio para todos los píxeles, el valor calculado fue de $27,35 (\pm 0,11) \text{ }^\circ\text{C}$; mientras que la

temperatura mínima promedio para todos los píxeles fue registrada el día 14 de Marzo de 2010 con valor de $12,03 (\pm 0,25) ^\circ\text{C}$.

Un 63,7% de los valores del producto MODIS *SST_11Nighttime* presentan valores nivel 3 siendo el producto que mayor cantidad de píxeles contaminados presenta, especialmente en invierno. En este caso, no se pudieron utilizar el 100% de las imágenes del píxel 2 y un 82,1% de los datos del píxel 3 (Figura 3). La temperatura máxima promedio para todos los píxeles fue registrada también el 21 de Agosto de 2011 con un valor de $27,14 (\pm 0,17) ^\circ\text{C}$ mientras que el día 18 de Febrero de 2011 se registró la temperatura mínima promedio con un dato de $10,16 (\pm 0,93) ^\circ\text{C}$ (Figura 4)

3.3. Comparación entre mediciones *in situ* y productos MODIS

Como se puede observar en la figura 5, los productos SST MODIS analizados recogen bien las dinámicas temporales que presenta la temperatura de la SST observada, aunque infraestiman, en general, la temperatura del mar.

Las diferencias promedio para todo el período de estudio entre la temperatura estimada por MODIS y la temperatura observada en campo, fluctúa para el producto *SST_4Nighttime* entre $-1,01$, $-0,97$ y $-1,01 ^\circ\text{C}$, para las profundidades 15, 50 y 100 cm. Para el producto *SST_11Daytime* las diferencias entre pares de valores promedio para la serie temporal son de $-0,13$, $-0,09$ y $-0,13 ^\circ\text{C}$ para

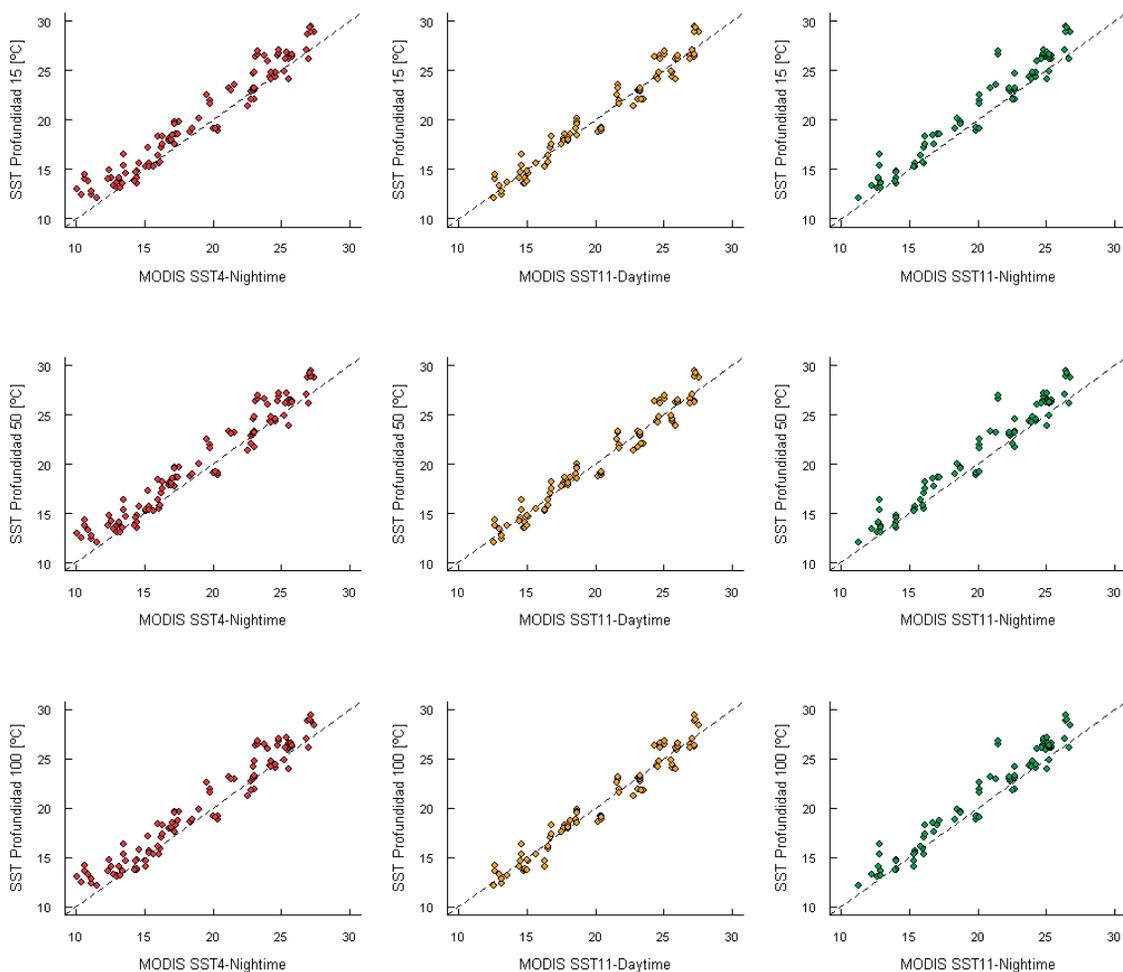


Figura 5. Correlaciones entre la SST registrada a diferentes profundidades y SST estimada por productos MODIS.

Tabla 2. Tabla resumen de los parámetros estadísticos resultado de la comparación de los productos MODIS y para cada una de las profundidades. (*SST_4Nighttime* se abrevia como *SST_4N*, *SST_11Daytime* como *SST_11D* y *SST_11Nighttime* como *SST_11N*).

Profundidad	Producto	n	r ²	m	b	RMSE
15 cm	SST_4N	30	0,86	0,99	0,95	1,52
	SST_11D	29	0,96	0,94	1,12	1,01
	SST_11N	26	0,94	0,91	0,83	1,67
50 cm	SST_4N	30	0,86	0,99	0,92	1,50
	SST_11D	29	0,96	0,94	1,11	1,00
	SST_11N	26	0,94	0,91	0,83	1,60
100 cm	SST_4N	30	0,86	0,99	0,80	1,45
	SST_11D	29	0,95	0,94	1,28	1,01
	SST_11N	26	0,94	0,91	0,94	1,55

las tres profundidades de menor a mayor, y -1,00, -0,98 y -1,00 °C las diferencias entre pares de valores para el producto nocturno *SST_11Nighttime*, a las profundidades 15, 50 y 100 respectivamente.

Estadísticamente no existen diferencias significativas entre las temperaturas estimadas por el sensor MODIS para sus tres productos y los valores de campo a diferentes profundidades (ANOVA, p=0,76, F crítica=2,24). El producto MODIS que presenta los mejores ajustes es el producto diario *SST_11Daytime* con unos índices de correlación (r²) de 0,96, 0,96 y 0,95 para las profundidades 15, 50 y 100 cm, respectivamente (Figura 5, Tabla 2). Además, el producto diario de 11 μm, presenta los errores cuadráticos medios (RMSE) más ajustados con valores de 1,01, 1,00 y 1,01 °C, para las profundidades 15, 50 y 100 cm.

Los datos de pendiente de ajuste muestran que el producto cuya pendiente es más próxima al ajuste perfecto (r²=1) es el producto *SST_4Nighttime*

con valores a todas las profundidades de 0,99. El que obtiene valores más distantes a 1 es el producto nocturno *SST_11Nighttime* con una pendiente máxima de 0,91. El producto *SST_11Daytime* presenta pendientes intermedias con valores de 0,94.

Los valores de b, muestran que el producto *SST_11Daytime* presenta una mayor desviación respecto a los otros productos comparados con valores superiores a 1°C. Puesto que las diferencias en los estadísticos obtenidos son bastante pequeñas, se han empleado diagramas de Taylor (Taylor 2001) para evaluar de manera gráfica el comportamiento de los productos a las diferentes profundidades medidas *in situ* (figura 6). En este caso y para hacer los resultados comparables entre sí, únicamente se han empleado aquellas fechas en las que existen datos para todos los productos.

Los diagramas muestran que ambos productos presentan un comportamiento muy similar y constante a todas las profundidades, siendo el producto



Figura 6. Diagramas de Taylor para evaluar las estimaciones de temperatura de los diferentes productos MODIS usando como referencia las temperaturas registradas *in situ* a diferentes profundidades.

SST_11Daytime el que más se aproxima a la variable observada, seguido del producto *SST_4Nighttime* y por último el producto *SST_11Nighttime*. En cuanto a la profundidad, los mejores resultados se han obtenido para las profundidades entre 50-60 cm, lo que sugiere que todos los productos podrían estar infraestimando la temperatura de superficie ya que la temperatura disminuye con la profundidad. Los diagramas muestran que, en cualquier caso, las estimaciones recogen de manera precisa las variaciones temporales, pues en todos los casos los modelos se asemejan mucho en cuanto a valores de desviación estándar y presentan un error cuadrático medio bajo.

Los resultados confirman los encontrados por otros autores en áreas cercanas a la costa. Así, Xie *et al.* (2008) encuentran una diferencia promedio anual entre la temperatura registrada por boyas y 5 productos GHRSSST (*Group for High Resolution Sea Surface Temperature*) de 0,95 °C para profundidades menores a 40 m. Sin embargo, como ya mencionamos en la introducción, al interpretar los resultados es preciso tener en cuenta que en este trabajo se ha comparado la SST derivada del satélite corresponde a la temperatura superficial del mar (*Skin layer*) con la registrada en zonas situadas por debajo de la superficie (*Bulk layer*). Las relaciones entre estos dos conjuntos de datos están fuertemente influenciadas por parámetros como el viento de tal forma que la diferencia se acentúa para vientos inferiores a 6 m s⁻¹ (Donlon *et al.*, 2002). En este sentido hubiera sido deseable contar con datos de viento para analizar su influencia sobre los ajustes obtenidos.

A pesar de estas diferencias entre los datos estimados por MODIS y los registrados *in situ*, podemos asumir dinámicas temporales muy similares, por lo que consideramos que es posible calibrar modelos de distribución de las especies de gelatinosos a partir de datos de SST observados con sensores de baja resolución espacial como MODIS lo que permitiría generar modelos predictivos espacio-temporales de la distribución de estas poblaciones.

4. Conclusiones

El producto MODIS nocturno para las bandas 20, 21 y 23 (*SST_4Nighttime*) es el que mayor cantidad de píxeles no contaminados presenta. Recogiendo la mayor cantidad de píxeles limpios durante

finales de invierno y principios de la primavera, cuando las diferencias de temperatura entre Tierra y Océano registran los valores más altos y producen las mayores cargas atmosféricas de humedad. Este producto resulta, por tanto, de especial interés para conocer la SST en determinadas épocas en ecosistemas costeros. Este producto presenta los estadísticos de la pendiente e interceptor de la recta de ajuste más cercanos al valor perfecto, aunque altos errores.

El producto diurno de temperatura elaborado a partir de las bandas 31 y 32 (*SST_11 Daytime*) es el que mejores parámetros estadísticos presenta para el coeficiente de correlación y los errores medios en comparación con los datos medidos a 50 cm de profundidad, aunque el número de píxeles no contaminados es menor que el procedente del algoritmo de 4 µm.

Por último, el producto nocturno *SST11_Nighttime* es el que mayor número de píxeles contaminados ha producido y el que presentaba los errores medios más altos.

Los productos de nivel 3 de MODIS presentan una resolución espacial baja lo que, en áreas litorales, puede suponer la pérdida continuada de información por contaminación terrestre de los píxeles costeros dando lugar a lagunas de información en los modelos de predicción de las especies.

La posibilidad de disponer de información auxiliar como la velocidad del viento en superficie permitiría reducir la incertidumbre sobre posibles discrepancias entre los datos *in situ* y los estimados por satélite ya que, en condiciones de fuerte viento, ambos datos pueden considerarse más comparables. Para futuros trabajos, proponemos que se considere fundamental la recogida y análisis de esta información.

La facilidad de estos productos para su descarga, procesado y análisis, hacen del STT nivel 3 de MODIS, una herramienta muy atractiva para la aplicación en el estudio de los ecosistemas por grupos de investigación no necesariamente experimentados, ni bajo disposición de usar software exclusivo de análisis y gestión de imágenes de satélite.

El estudio realizado demuestra que la SST estimada por MODIS mantiene dinámicas muy similares a los datos de campo, por lo que podemos plantear su uso para modelos de distribución de especies

costeras. Los ciclos vitales y el crecimiento de los cubozoos, especialmente las especies costeras, se encuentran influenciados por la temperatura y otros parámetros ambientales. El proceso de metamorfosis del pólipo parece estar influenciado por la combinación de la temperatura y la luz. En el caso concreto de la especie *Carybdea marsupialis*, especie objetivo del proyecto LIFE CUBOMED, en el que se inscribe esta investigación, se ha observado que las capturas de cubomedusas se encuentran relacionadas con la temperatura, entre otros factores. Así pues, según los resultados derivados de este trabajo de validación, la utilización de los registros de SST disponibles del satélite Aqua puede aportar una base de datos adecuada a partir de los cuales desarrollar modelos de distribución de esta y otras especies del plancton gelatinoso.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte económico de LIFE+08NAT-CUBOMED (<http://www.cubomed.eu>) para la adquisición de datos in situ, a la NASA (<http://www.nasa.gov>) que ha facilitado las imágenes de forma gratuita, y al programa JAE-TEC del CSIC que ha financiado el contrato de Elia Durá. Nuestro agradecimiento a los voluntarios de CUBOMED, especialmente a Neus Figueras, Leticia Vázquez, Vicente Bernabeu y Felipe Escolano, por su valioso trabajo. Agradecemos finalmente al Portet de Dénia (www.elportetdedenia.es), al Real Club Náutico de Dénia (www.cndenia.es) y a la Fundación Balearia (www.balearia.com) por su apoyo.

Referencias

Azorín-Molina, C., Martín-Vide, J. 2007. Methodological approach to the study of the daily persistence of the sea breeze in Alicante (Spain). *Atmósfera*, 20(1): 57-81.

Bordehore, C., Fuentes, V.L., Atienza, D., Barberá, C., Fernández-Jover, D., Roig, M., Acevedo-Dudley M.J., Canepa A.J., Gili, J.M. 2011. Detection of an unusual presence of the cubozoan *Carybdea marsupialis* at shallow beaches located near Denia, Spain (south-western Mediterranean). *Marine Biodiversity Records*, 4: 1-6. <http://dx.doi.org/10.1017/S1755267211000650>

Brotz, L., Cheung, W.L., Kleisner, K., Pkhomov, E., Pauly, D. 2012. Increasing jellyfish populations: trends in large marine ecosystems. *Hydrobiologia*, 690(1): 3-20. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-012-1039-7>

Brown, O.B., Minnett, P.J. 1999. MODIS infrared sea surface temperature algorithm - Algorithm Theoretical Basis Document. Products: MOD28. ATBD Reference Number: ATBD-MOD-25. Último acceso 07/06/2014, de http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod25.pdf

Donlon, C.J., Minnett, P.J., Gentemann, C., Nightingale, T.J., Barton, I.J., Ward, B., Murray, M.J. 2002. Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *Journal of Climate*, 15(4): 353-369. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0353:TIVOSS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0353:TIVOSS>2.0.CO;2)

Follos-Pliego, F. 2012. Lenguaje R aplicado al análisis de datos de calidad del aire. *Manual básico para el tratamiento de datos de calidad del aire mediante el lenguaje estadístico R y paquetes adicionales como Openair*. Último acceso 07/06/2014, de http://www.openair-project.org/PDF/R_Openair_aplicado_a_calidad_del_aire.pdf

Franz, B. 2006. *Implementation of SST Processing within the OBP*. Último acceso: 04/06/2014, de http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/modis_sst

Fuentes, V.L., Angel, D.L., Bayha, K.M., Atienza, D., Edelist, D., Bordehore, C., Gili, J.M., Purcell, J.E. 2010. Blooms of the invasive ctenophore, *Mnemiopsis leidyi*, span the Mediterranean Sea in 2009. *Hydrobiologia*, 645(1): 23-37. doi:10.1007/s10750-010-0205-z

Gentemann, C.L., Wentz, F.J., Mears, C.A., Smith, D.K. 2004. *In situ* validation of Tropical Rainfall Measuring Mission microwave sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 109 (4). doi:10.1029/2003JC002092

Harvell, C.D., Mitchell, C.E., Ward, J.R., Altizer, S., Dobson A.P., Ostfeld R.S., Samuel, M.D. 2002. Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science*, 296(5576): 2158-2162. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1063699>

Hernández, B. 2002. Variabilidad interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar en aguas cubanas y su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). *Revista de Investigaciones Marinas*, Valparaíso, 30(2): 21-31.

Levitus, S., Antonov, J.I., Boyer T.P., Stephens, C. 2000. Warming of the World Ocean. *Science*, 287(5461): 2225-2229. <http://dx.doi.org/10.1126/science.287.5461.2225>

López Saldaña, G., Colditz, R., Cruz López M.I., Ressler, R., Mas, J.F. 2011. Herramientas para el análisis de los datos de MODIS. *Aplicaciones del Sensor MODIS para el Monitoreo del Territorio*, México, pp. 71-93.

- Purcell, J.E. 2005. Climate effects on formation of jellyfish and ctenophore blooms: a review. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 85(3): 461-476. <http://dx.doi.org/10.1017/S0025315405011409>
- Richter, K., Atzberger, C., Hank, T.B., Mauser, W. 2012. Derivation of biophysical variables from Earth Observation data: validation and statistical measures. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1): 063557, 1-23. doi:10.1117/1.JRS.6.063557
- Schluessel, P., Emery, W.J., Grassl, H., Mammen, T. 1990. On the bulk-skin temperature difference and its impact on satellite remote sensing of sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research, Oceans*, 95(8): 13341-13356. <http://dx.doi.org/10.1029/JC095iC08p13341>
- Shabbar, A., Bonsal, B., Khandekar, M. 1997. Canadian precipitation patterns associated with the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 10(12): 3016-3027. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<3016:CPPAWT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<3016:CPPAWT>2.0.CO;2)
- Smale, D. A., Wernberg, T. 2009. Satellite-derived SST data as a proxy for water temperature in nearshore benthic ecology. *Marine Ecology, Prog. Ser.*, 387(2): 27-37. doi:10.3354/meps08132
- Taylor, K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal Geophysical Research, Atmospheres*, 106(D7): 7183-7192. <http://dx.doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Tokioka, T. 1983. Influence of the ocean on the atmospheric global circulations and short-range climatic fluctuations. En: G.D. Sharp and J. Csirke (eds.). *Proceeding of the expert consultation to examine change in abundance and species of neritic fish resources*. San José de Costa Rica. FAO Fish. Rep., 291(3): 557-585.
- Xie, J., Zhu, J., Li Y, 2008. Assessment and inter-comparison of five high-resolution sea surface temperature products in the shelf and coastal seas around China. *Continental Shelf Research*, 28(10-11): 1286-1293. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2008.02.020>
- Zhang H.M., Reynolds R.W., Smith T.M., 2004. Bias characteristics in the AVHRR sea surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 31(1): L01307. <http://dx.doi.org/10.1029/2003GL018804>